

Impact des extractions de graviers dans le lit mineur sur la géométrie des zones aquatiques périfluviales du Doubs (France)

Impacts of in-stream gravel mining on the geometry of perfluvial aquatic zones of the Doubs River (France).

Anne-Julia Rollet, Hervé Piégay et Anne Citterio

Volume 60, numéro 3, 2006

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/017999ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/017999ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Rollet, A.-J., Piégay, H. & Citterio, A. (2006). Impact des extractions de graviers dans le lit mineur sur la géométrie des zones aquatiques périfluviales du Doubs (France). *Géographie physique et Quaternaire*, 60(3), 253–269.
<https://doi.org/10.7202/017999ar>

Résumé de l'article

Durant la décennie 70, les extractions de sédiments en lit mineur ont connu une forte croissance dans les cours d'eau, notamment en France comme dans la plupart des pays développés. Si l'impact de ces activités extractives sur l'équilibre géomorphologique et biologique des cours d'eau a déjà été largement analysé, plus rares sont les études mettant en lumière l'effet des extractions sur les habitats écologiques des lits majeurs. L'objectif de cet article est d'évaluer rétrospectivement les effets des extractions dans le lit mineur du Doubs, un affluent de la Saône (France), sur l'évolution des zones aquatiques périfluviales, à partir d'analyses d'archives, de données issues de levés *in situ* et de photographies aériennes. L'incision du lit en relation avec les activités extractives en lit mineur est d'abord mise en lumière. À partir de l'étude détaillée de 12 zones aquatiques périfluviales, un lien chronologique a ensuite été établi entre l'incision du chenal et la réduction de la superficie des zones humides périfluviales. L'intensité de la réduction n'est pas liée à la proximité de la fosse, l'incision touchant tout le tronçon et à la géométrie des berges. La recherche de liens causaux s'appuie sur un faisceau de preuves convergentes suffisamment robustes pour valider l'hypothèse initiale sachant que les preuves sont souvent partielles et les conditions d'utilisation de certaines données dans un cadre diachronique rigoureux sont restreintes.

IMPACT DES EXTRACTIONS DE GRAVIERS DANS LE LIT MINEUR SUR LA GÉOMÉTRIE DES ZONES AQUATIQUES PÉRIFLUVIALES DU DOUBS (FRANCE)

Anne-Julia ROLLET*, Hervé PIÉGAY et Anne CITTERIO ; Université Jean Moulin Lyon III, UMR 5600 CNRS Environnement-Ville-Société, Site ENS-LSH, 15 Parvis René Descartes, B.P. 7000, 69342 Lyon Cedex 07, France.

RÉSUMÉ Durant la décennie 70, les extractions de sédiments en lit mineur ont connu une forte croissance dans les cours d'eau, notamment en France comme dans la plupart des pays développés. Si l'impact de ces activités extractives sur l'équilibre géomorphologique et biologique des cours d'eau a déjà été largement analysé, plus rares sont les études mettant en lumière l'effet des extractions sur les habitats écologiques des lits majeurs. L'objectif de cet article est d'évaluer rétrospectivement les effets des extractions dans le lit mineur du Doubs, un affluent de la Saône (France), sur l'évolution des zones aquatiques périfluviales, à partir d'analyses d'archives, de données issues de levés *in situ* et de photographies aériennes. L'incision du lit en relation avec les activités extractives en lit mineur est d'abord mise en lumière. À partir de l'étude détaillée de 12 zones aquatiques périfluviales, un lien chronologique a ensuite été établi entre l'incision du chenal et la réduction de la superficie des zones humides périfluviales. L'intensité de la réduction n'est pas liée à la proximité de la fosse, l'incision touchant tout le tronçon et à la géométrie des berges. La recherche de liens causaux s'appuie sur un faisceau de preuves convergentes suffisamment robustes pour valider l'hypothèse initiale sachant que les preuves sont souvent partielles et les conditions d'utilisation de certaines données dans un cadre diachronique rigoureux sont restreintes.

ABSTRACT *Impacts of in-stream gravel mining on the geometry of perifluvial aquatic zones of the Doubs River (France).* During the 1970's, in-stream gravel mining practices increased considerably in rivers of developed countries and in French rivers particularly. While the impacts of this activity on the geomorphological and biological equilibrium of the streams are well known, there is a paucity of studies examining the effects of in-stream gravel mining on adjacent floodplains and the ecological diversity they provide. In this context, the aim of this paper is to estimate retrospectively the impacts of gravel mining in the channel of the Doubs River (Eastern France), a tributary of the Saône River. The evolution of the perifluvial aquatic zones is examined using archives of hydro-geomorphological data and historical air photographs. Firstly, the analysis highlights the link between in-stream gravel mining and bed degradation. Secondly, a detailed study of 12 perifluvial aquatic zones has established a link between bed degradation and reduction of perifluvial aquatic zone areas, which is dependent on bank geometry in these zones. The identification of causal relations is supported by converging lines of evidence, which are strong enough to validate the initial hypothesis that in-stream gravel mining impacts the biodiversity of adjacent floodplains. However, the evidence is often partial and the use of some data may be in a diachronic framework of the study.

INTRODUCTION

À partir des années 1950, et surtout au cours de la décennie 70, les extractions de sédiments en lit mineur ont enregistré une forte croissance en France et dans les autres pays développés, car les besoins de granulats pour la construction de logements et la densification des réseaux routiers étaient importants (Carré et Chartier, 2002). Durant cette période, les lits mineurs ont constitué des sites d'extraction très appréciés. Les procédés d'exploitation sont plus simples et donc moins onéreux que ceux utilisés pour l'exploitation de matériaux en terrasse ou en roches massives. Les matériaux extraits sont naturellement lavés et triés, se présentent sous forme granulaire et ne sont généralement pas cimentés (Laronne, 2000). Ces gisements sont souvent localisés à proximité des secteurs de consommation ou de transformation, ce qui permet de limiter les coûts de transport par rapport à l'exploitation d'autres sources (Bossy et Glard, 1981 ; Kondolf, 1994).

Plusieurs auteurs ont déjà analysé l'impact des extractions en lit mineur sur l'équilibre géomorphologique et biologique des cours d'eau. Ces effets sont particulièrement importants et difficilement réversibles lorsque les volumes extraits dépassent largement les volumes transportés et que l'alimentation en sédiments a été interrompue. C'est le cas de tronçons fluviaux très aménagés où la recharge ne peut se faire par érosion latérale et où les apports amont sont stockés dans des retenues ou extraits plus à l'amont encore (Rinaldi *et al.*, 2005).

Les extractions en lit mineur induisent des modifications du profil en long. Les fosses d'extraction agissent comme des pièges à sédiments (Kondolf, 1997) et interrompent le transfert des sédiments vers l'aval. Cette rétention de la charge de fond peut affecter les littoraux où, faute d'apports de sédiments, l'érosion des plages et la pénétration de l'eau de mer s'accroît à l'intérieur des terres (Erskine, 1990 ; Gaillot et Piégay, 1999). Plus localement, des processus d'érosion progressive et régressive se manifestent à l'amont et à l'aval des fosses d'extraction (Galay, 1983 ; Erskine, 1990 ; Marston *et al.*, 2003). Il s'agit en fait d'une propagation amont et aval de l'incision d'un lit qui se poursuit jusqu'à ce que le fond du cours d'eau retrouve un profil d'équilibre, une pente lui permettant de transporter sur le tronçon la charge qui lui est fournie à l'amont. Le phénomène peut s'interrompre prématurément si un pavage se développe (Gaillot et Piégay, 1999) ou si le fond du lit se cale sur des points durs tels que des affleurements rocheux exhumés par l'incision ou des seuils artificiels (Petit *et al.*, 1996 ; Piégay et Peiry, 1997). La période de temps durant laquelle une extraction affecte la géométrie d'un lit dépend donc du volume de matériaux prélevé et du débit solide moyen annuel du cours d'eau (Ramez et Gilard, 1992). La longueur de la fosse d'extraction, plus que sa profondeur, apparaît comme le principal paramètre qui régit l'intensité de ces phénomènes d'ajustement (Larinier, 1980). Les extractions en lit mineur favorisent également l'incision du lit et la déstabilisation des aménagements (Collins et Dunne, 1990 ; Kondolf, 1997 ; Erskine et Green, 2000 ; Marston *et al.*, 2003). Ces processus sont directement liés au surcreusement du lit au droit du site du fait de l'exploitation, et plus largement du fait

des ajustements morphologiques par érosion progressive et régressive. Par un système de rétroaction positive, une concentration des écoulements dans le chenal est souvent observée lors de cette première phase d'incision qui se traduit par une augmentation de la capacité de transport solide du cours d'eau et une accélération de l'enfoncement du lit (Bravard *et al.*, 1999).

Les conséquences sont multiples : déstabilisation des berges induisant leur glissement, notamment dans les secteurs sableux, et élargissement du lit (Shields, 1995 ; Erskine, 1997 ; Bravard *et al.*, 1999), développement d'un pavage par vannage des particules transportables dans le cas de lits fluviaux à granulométries contrastées (Simons et Lagasse, 1976 ; Assani, 1997), ou encore simplification des faciès géomorphologiques par disparition, par exemple, des alternances de seuils et de mouilles du fait de la raréfaction de la charge en transit (Bravard *et al.*, 1999). Dans certains cas, comme la rivière Russian près de Healdsburg en Californie, où l'incision atteint 3 à 6 m, ces processus peuvent aboutir à un changement radical du style fluvial (Kondolf, 1993). Ces incisions ont des incidences économiques importantes, car elles déstabilisent les ouvrages par affouillement. C'est le cas des piles de pont ou des digues (Scott, 1973 ; Collins et Dunne, 1990 ; Kondolf, 1994, 1997) ; des conduites souterraines peuvent également être exhumées et endommagées (Kondolf et Larson, 1995). Ces modifications du système fluvial ont évidemment des impacts sur les conditions environnementales (substrat, ressources trophiques) et, par conséquent, sur les conditions de développement des communautés floristiques et faunistiques dans le chenal (Harvey et Schumm, 1987 ; Beaudelin, 1989 ; Collins et Dunne, 1990 ; Erskine, 1990, 1997 ; Suard, 1990 ; Kondolf, 1997 ; Erskine et Green, 2000).

Si l'effet des extractions est aujourd'hui bien connu au niveau du lit mineur, plus rares sont les études concernant l'effet des extractions sur les lits majeurs et les habitats qu'ils procurent. L'incision du lit peut aussi entraîner un abaissement de la nappe d'accompagnement dont le niveau est étroitement lié au niveau de la ligne d'eau du chenal (Scott *et al.*, 1999). Ceci aura des incidences écologiques et économiques si cette nappe fait l'objet d'une exploitation. Si l'enfoncement du lit entraîne une augmentation significative des capacités d'écoulement du lit mineur, il peut en résulter une diminution de la fréquence et de l'intensité des inondations dans la plaine alluviale. Ce phénomène peut être à l'origine d'une réduction des capacités de laminage de la plaine alluviale (Collins et Dunne, 1990 ; Kondolf, 1997 ; Surian, 1999 ; Surian et Rinaldi, 2003). Ces différents changements hydrologiques et hydrogéologiques affectent directement les milieux aquatiques périfluviaux (Bornette *et al.*, 1996) provoquant une altération des spécificités hygrophiles des peuplements riverains (Pautou *et al.*, 1996 ; Bravard *et al.*, 1999).

Les zones aquatiques périfluviales présentent un fonctionnement hydraulique et hydrologique contrasté expliquant la présence d'espèces ayant différentes exigences écologiques. Par ailleurs, leur renouvellement périodique par les crues maintient des espaces de colonisation, limitant ainsi les phénomènes d'exclusion par compétition interspécifique à l'origine d'une diversité végétale importante (Barrat-Segretain

et Amoros 1996; Bornette *et al.*, 1996). Au-delà du patrimoine écologique qu'ils abritent, ces espaces assurent également des fonctions importantes pour les sociétés riveraines, à savoir l'auto-épuration des apports agricoles ou le laminage des crues (Barnaud, 1996).

Si les changements écologiques associés à l'incision des lits fluviaux sont relativement bien exemplifiés (Bornette et Heiler, 1994; Bravard *et al.*, 1997), rares sont les travaux mettant clairement en évidence les effets hydrologiques et hydrogéologiques des extractions. Il est peu commun d'obtenir des données piézométriques au droit d'extraction de granulats ayant enregistré le niveau d'eau avant, pendant et après la phase d'extraction.

L'objet de cet article est de s'appuyer sur les informations historiques existantes sur le Doubs, un affluent de la Saône (France), pour évaluer rétrospectivement les effets des extractions en lit mineur sur la géométrie des zones aquatiques périfluviales (ZAP). Deux hypothèses sont ainsi formulées et testées, la première a été largement vérifiée rétrospectivement sur d'autres cours d'eau et est une condition nécessaire pour valider la seconde : (1) les extractions en lit mineur induisent un enfoncement, non seulement au droit des sites, mais aussi à l'aval et à l'amont du fait des érosions progressives et régressives s'y manifestant; (2) l'enfoncement du lit mineur s'accompagne d'un enfoncement de la nappe d'accompagnement et d'une réduction des ZAP. Les ZAP correspondent à des zones en eau permanentes occupant l'ensemble ou une partie de bras morts recoupés artificiellement ou naturellement, au cours des deux derniers siècles (Piégay *et al.*, 2000). Il s'agit d'écosystèmes riverains particulièrement riches au niveau écologique (Bornette *et al.*, 1998) faisant l'objet d'actions de préservation ou de restauration.

PRÉSENTATION DU SECTEUR D'ÉTUDE

S'écoulant sur près de 450 km, le Doubs draine un bassin versant avoisinant 7 700 km². Le tronçon d'étude se situe à l'aval de la confluence avec la Loue et s'étend sur 37 km de linéaire. Le régime pluvionival de cette rivière est considéré comme très contrasté durant l'année, avec des étiages sévères en été (15 à 20 m³/s) et des crues importantes en hiver ($Q_{10} = 1\,400\text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{50} = 1\,800\text{ m}^3/\text{s}$). Avec une pente comprise en moyenne entre 0,055 et 0,06 % dans le tronçon étudié, cette rivière a tendance au méandrage, avec un taux de sinuosité moyen de 1,8 (BRL, 1999). Il s'agit d'un système anastomosé déliquescent depuis le 19^e siècle à la suite de la multiplication des endiguements. Elle possède également un transport solide actif, estimé entre 50 000 et 100 000 m³ par an d'après la formule de Meyer-Peter (Malavoi, 2004).

La richesse faunistique et floristique de la basse vallée du Doubs a été largement reconnue et fait actuellement l'objet d'une protection spécifique par le biais de plusieurs réglementations européennes. Elle a ainsi été classée en Zone Natura 2000 en 1998, en Zone Naturelle d'Intérêt Écologique, Faunistique et Floristique (ZNIEFF) ainsi qu'en Zone Importante pour la Conservation des Oiseaux (ZICO) sur 11 850 ha. Ces richesses ont été menacées par la dégrada-

tion du système fluvial à la suite des aménagements et des extractions de granulats tout au long des 19^e et 20^e siècles.

Au cours des deux derniers siècles, le chenal a connu d'importantes transformations morphologiques (Sauty, 1999). De façon générale, le tracé de la rivière dans la basse vallée s'est simplifié. Fortement endigué et rectifié au cours du 19^e siècle, le Doubs a abandonné son style en tresses, anastomosé sur ses marges, pour un chenal unique incisé à méandres, mais relativement mobile sur les tronçons encore naturels. Le profond déséquilibre que connaît ce cours d'eau au milieu du 20^e siècle a été ensuite largement aggravé par les extractions en lit mineur.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Afin de vérifier l'ensemble de nos hypothèses selon lesquelles l'activité extractive a des effets sur les zones aquatiques périfluviales, une analyse rétrospective s'appuyant sur un ensemble de sources a été conduite afin de bien connaître l'évolution de la géométrie du chenal et des zones aquatiques et d'établir des correspondances chronologiques permettant de valider les liens de cause à effet.

CALAGE CHRONOLOGIQUE DE L'ACTIVITÉ EXTRACTIVE ET ÉVALUATION DES VOLUMES EXTRAITS

En raison de la confidentialité des informations, il est très difficile de se procurer des données concernant l'historique et les volumes extraits dans les carrières. Nous avons cependant eu accès aux archives de la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) du département de Saône et Loire. Dans notre secteur d'étude, trois grands sites d'exploitation ont été étudiés : Champdivers (ouverture vers 1960), Fretterans (ouverture vers 1975) et Lays-sur-le-Doubs (ouverture vers 1970), respectivement identifiés fosse 1, 2 et 3 sur la figure. 1. Ces sites étant suffisamment importants pour avoir été soumis aux requêtes administratives, des archives existent et permettent de quantifier les volumes extraits. De plus, leur emprise spatiale est visible sur les photographies aériennes et leurs effets sur le chenal sont suffisamment marqués pour avoir un impact potentiel sur la ligne d'eau et le niveau de nappe dans la plaine alluviale. Trois types de documents différents et complémentaires ont pu être dépouillés à savoir (1) les arrêtés préfectoraux (obligatoires à partir de 1979) indiquant le volume annuel maximum autorisé, (2) les attestations d'occupation temporaire (annuelles ou biennuelles établies par la Direction Départementale de l'Équipement) renseignant sur les volumes qui vont être extraits et la localisation exacte de l'extraction, et (3) les fiches de bilan des exploitations. Ces dernières, établies lors de la fermeture de l'exploitation, récapitulent l'ensemble des arrêtés émis pour un secteur précisément défini et indiquent les dates d'ouverture et de fermeture des exploitations (Rollet, 2003). Ces archives ont permis de reconstituer la chronologie détaillée des extractions, de dater les pics d'exploitation et de quantifier secteur par secteur les volumes totaux extraits.

ÉVOLUTION DU LIT DEPUIS LES ANNÉES 1960

Notre étude repose sur l'analyse de profils en long existants, complétés par des levés topographiques actuels. Il s'agit de profils du fond du lit et de lignes d'eau d'étiage.

Les profils de fonds de lit ont été levés en 1987 par le bureau d'étude Sogreah (0,8 points par km) et en 1996 par la Compagnie Nationale du Rhône (1,2 points par km). Les don-

nées de 1996 sont en fait des profils en travers sur lesquels les points de talweg ont été extraits pour reconstituer un profil en long.

Quatre profils de ligne d'eau ont également été utilisés. Deux d'entre eux couvrent le secteur entre la confluence de la Loue et Lays-sur-le-Doubs (tabl. I), mais correspondent à des débits sensiblement différents. Celui de 1966 a été levé par les services de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) sur un

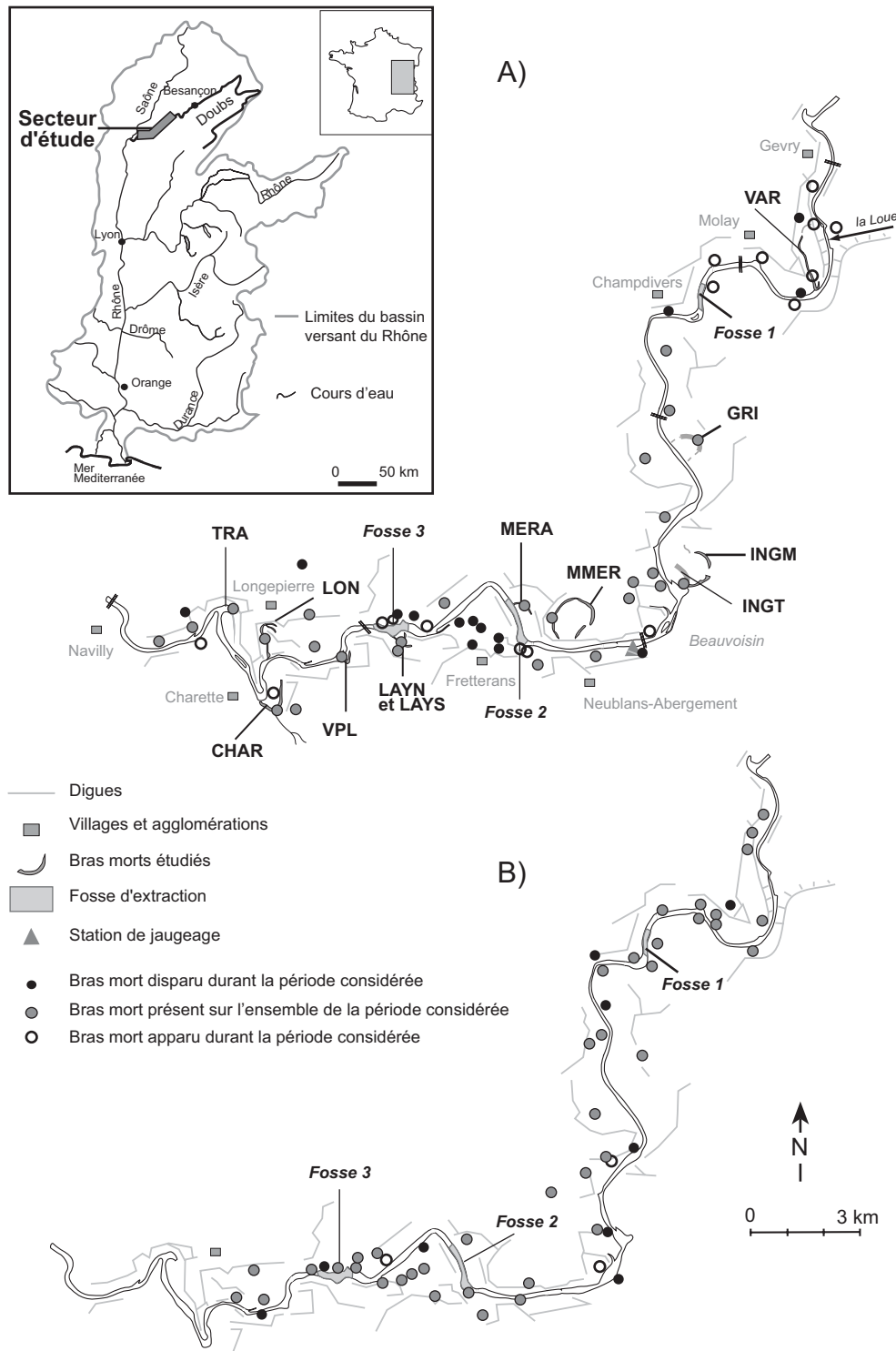


FIGURE 1. Carte de localisation des bras morts recensés à partir des photos aériennes de (A) 1953-2002 et (B) 1978-2001 ; le secteur d'étude est illustré dans le cartouche (coin supérieur gauche).

Location map of oxbows registered from aerial photographs of (A) 1953-2002 and (B) 1978-2001 ; the study area is shown in the insert (upper left corner).

mois, pour des débits de 35 à 160 m³/s. Le profil de 1987 a également été modélisé à l'aide de différents débits, ceux-ci variant de 60 à 210 m³/s (Sogreah, 1987). Ce jeu de données est complété par deux profils de ligne d'eau d'étiage levés en 1967 et 1979 par les services de la CNR (Malavoi, 2004). Ceux-ci nous permettent d'obtenir des informations sur l'évolution verticale du chenal en aval de la fosse de Lays-sur-le-Doubs.

Enfin, nous avons complété ces données par un levé de la ligne d'eau en 2003 au droit des anciens sites d'extraction afin de mieux tirer partie des données historiques disponibles (13 à 15 points par km). Les lignes d'eau, correspondant à des débits de 45 à 85 m³/s, ont été corrigées à l'aide des courbes de tarage pour les rendre comparables aux débits des profils de 1966 et 1987.

L'analyse des profils en long permet de comprendre la variabilité longitudinale des évolutions altimétriques, mais ne rend pas pleinement compte des évolutions temporelles, principalement des périodes où l'incision s'accélère, ou, au contraire, se ralentit, voire ne se manifeste pas. De fait, cette approche a été complétée par une analyse des courbes de tarage qui rend compte plus finement des ruptures de tendance au cours du temps en un site donné. Nous avons observé l'évolution des hauteurs d'eau enregistrées à la station de Neublans-Abergement sur la période 1965-2002 pour des débits équivalents au débit moyen annuel compris entre 170 et 180 m³/s. Cette station se trouvant sur un tronçon rectiligne au droit d'un pont, nous considérons que les changements de hauteur d'eau intervenus pour un débit donné sont dus à l'incision ou à l'exhaussement du fond du lit.

L'évolution de la forme en plan du chenal a également fait l'objet d'une analyse détaillée à partir des photographies aériennes de l'IGN réalisées en 1978, 1989, 1996 et 2001 (tabl. II). Les bandes actives (chenal en eau et bancs non végétalisés) ont été numérisées, puis superposées afin de quantifier la mobilité latérale du chenal depuis 1978. Le tronçon a été divisé en segments de 250 m afin d'analyser quan-

titativement l'évolution longitudinale des changements en plan enregistrés par la rivière. Ces données ont été complétées par un couple d'images satellites SPOT 5 composé d'une image multi spectrale de 1986 (résolution spatiale de 20 m) et d'une image panchromatique de 1997 (résolution spatiale de 10 m), la première ayant été acquise par le biais du groupement pour le développement de la télédétection aérospatiale et la seconde, par le Centre National d'Étude Spatiale (programme ISIS). Contrairement aux photographies aériennes utilisées dans le cadre de cette étude (tabl. II), ces supports nous fournissent une représentation de l'ensemble de notre secteur d'étude à débit égal (100 m³/s).

ÉVOLUTION DE LA GÉOMÉTRIE DES ZONES AQUATIQUES PÉRIFLUVIALES DEPUIS LES ANNÉES 1960

Analyse des photographies aériennes

Les prises de vue aériennes réalisées par l'IGN correspondent à des débits différents d'une mission à l'autre, voire au sein d'une même mission lorsque celle-ci se déroule sur plusieurs jours (tabl. II). De fait, si cela ne pose pas de problème lorsqu'il s'agit d'étudier la superficie de la bande active, l'analyse de l'évolution surfacique des zones aquatiques périfluviales est plus délicate si les états sont observés à des débits différents. Les comparaisons inter dates ne deviennent possibles que pour des missions réalisées lors de mêmes débits.

Seulement quatre séries restent comparables deux à deux, sur l'ensemble du secteur étudié (1953-2002 et 1978-2001), les autres missions étant utilisées pour l'analyse plus ponctuelle des douze ZAP. Sur chacune de ces quatre séries, nous avons procédé au recensement de tous les bras morts comportant au moins un plan d'eau visible. Nous avons ainsi pu dénombrer les plans d'eau des bras morts en 1953, 1978, 2001 et 2002, et déterminer leur évolution en présence/absence au cours des périodes 1953-2002 et 1978-2001.

TABEAU I

Liste des profils de ligne d'eau analysés

Sources	Dates des relevés	Secteur	Débits moyens journaliers à Neublans	Méthode de correction (avant comparaison avec 1966)
Malavoi (2004)	29-09-1966	Loue—Lays-Sur-Le-Doubs	37	
	08-09-1966		52	
	25-08-1966		158	
Malavoi (2004)	1967	Neublans—Abergement-Navilly	étiage	
Malavoi (2004)	1979	Neublans—Abergement-Navilly	étiage	
Sogreah (1987)	1987	Loue—Lays-Sur-Le-Doubs	60	modélisation
			105	
			210	
Rollet (2003)	08-04-2003	Pont de Neublans—Lays-Sur-Le-Doubs	85	courbes de tarage
	23-04-2003		45	

TABLEAU II
Caractéristiques des photographies aériennes analysées

Série	Nombre de missions	Dates	Secteur	Échelle	Débit lors du levé (m ³ /s)	Type
1953	1	05-05-1953	Dole-Navilly	1/25 000	53	NG
1969	2	09-06-1969	Dole-Longepierre	1/15 000	248	NG
		05-06-1970	Longepierre-Navilly	1/30 000	334	NG
1978	2	07-10-1976	Charrette-Navilly	1/17 000	126	IR
		18-08-1978	Dole-Charrette	1/15 000	128	NG
1989	2	03-08-1989	Dole-Charrette	1/18 000	24	NG
		30-05-1991	Charrette-Navilly	1/30 000	53	NG
1996	2	15-06-1996	Dole-Charrette	1/27 000	84	Couleur
		20-08-1997	Charrette-Navilly	1/25 000	52	Couleur
2001	1	23-06-2001	Dole-Charrette	1/25 000	120	Couleur
2002	3	16-09-2002	Neublans-Abergement	1/25 000	38	Couleur
		08-07-2002	Lays-sur-Le-Doubs-Navilly	1/25 000	38,5	Couleur
		25-06-2002	Dole-Longwy et Fretterans	1/25 000	65,9	Couleur

NG : Niveaux de gris, IR : Infrarouge.

De plus, douze bras morts ont été sélectionnés en fonction de critères hydrobiologiques, hydrauliques et géomorphologiques (Amoros *et al.*, 2000) (fig. 1). En effet, ces bras morts présentent des plans d'eau suffisamment importants (>1 ha) pour pouvoir faire l'objet d'une étude par photographie aérienne. L'exploitation des fosses d'extraction étudiées ne commençant qu'à partir de 1964, les clichés de 1953 nous renseignent sur l'état de référence des ZAP avant les extractions massives de granulats. Les ZAP de CHAR et VAR (fig. 1) n'ont pas pu être analysées à cette date, la première étant en dehors de la zone couverte par les clichés, et la seconde n'existant pas encore (création en 1965). Sur l'ensemble des photographies aériennes géoréférencées, les ZAP sélectionnées ont été numérisées manuellement. Pour cette opération, nous n'avons pas utilisé des outils de détection automatique s'appuyant sur les valeurs radiométriques des pixels, car les plans d'eau ne comportent pas une gamme de valeurs spécifiques permettant facilement leur reconnaissance. Cette opération ne s'appuie donc que sur les interprétations de l'opérateur. Afin de limiter les erreurs, un seul opérateur s'est chargé de la reconnaissance et de la numérisation des surfaces en eau des douze ZAP. Cette étape a été validée par des observations sur le terrain.

Données de terrain

La topographie de onze zones aquatiques sur les douze étudiées (fig. 1) a été réalisée relativement à la ligne d'eau (levé d'un profil en long et de trois profils en travers pour chacune d'elles). La profondeur des plans d'eau est dépendante du niveau de l'eau au jour des relevés, le niveau étant lié au débit de la rivière ou de l'aquifère et au degré de connexion de chaque ZAP avec le bras principal. Les plans d'eau ont été sondés à l'aide d'une perche jusqu'à atteindre un niveau résistant considéré comme étant le plafond du sédiment grossier (graviers). Les sondages n'excèdent pas 2,5 m,

soit la longueur de la perche et du bras, ou moins si la profondeur du plan d'eau est trop importante. Les sondages ont été répétés sur toute la longueur du plan d'eau à intervalles réguliers (10 ou 50 m). Seule la topographie de la ZAP de INGM est incomplète, les berges n'ayant pu être correctement levées pour des raisons d'accessibilité. Leur géométrie n'a donc pas pu être définie.

Nous avons observé un abaissement de 80 cm de la ligne d'eau correspondant au débit moyen annuel (170 m³/s) au droit de la station de jaugeage de Neublans-Abergement entre 1967 et 1998. Dans le but de nous assurer qu'un changement de niveau d'eau se traduit par une évolution de la superficie visible sur les photographies, nous avons simulé un abaissement de ligne d'eau équivalent sur les profils topographiques des ZAP levés en 1999. En effet, si les berges des plans d'eau sont parfaitement verticales, l'abaissement du plan d'eau ne se traduit pas par une réduction surfacique et n'est donc pas observable à partir des photographies aériennes. À partir des profils en long et en travers levés sur les ZAP en 1999, nous avons calculé pour chaque plan d'eau la réduction de largeur et de longueur qu'engendre un abaissement de 80 cm du niveau d'eau, puis recalculé leur superficie d'après ces nouvelles mesures.

RÉSULTATS

HISTORIQUE DES EXTRACTIONS

L'étude des archives indique que pour l'ensemble des fosses étudiées, le maximum tant au niveau des volumes extraits que de l'extension des surfaces est atteint au début des années 1980 (fig. 2). L'étude diachronique de la superficie des fosses à partir des photographies aériennes permet d'estimer le début des extractions entre 1950 et 1960. Sur ces photographies, un léger décalage temporel peut aussi être

observé entre l'extension maximale des fosses d'extraction (1978) et les volumes maximum extraits (1982-1985). Cela démontre que dans un premier temps (1950-1980), les sites d'extraction se sont étendus spatialement alors que, dans un second temps, les prélèvements se sont poursuivis par surcreusement des zones déjà concernées. L'activité extractive se manifeste principalement du début des années 1970 à la fin des années 1980. La comparaison des volumes et des superficies (fig. 2) permet de mettre en évidence le temps de réponse entre la fin effective des extractions et le début de comblement des fosses. Celui-ci est de sept ans sur la fosse en aval de notre zone d'étude alors que les fosses en amont semblent totalement comblées en 2001, que ce soit sur les photographies aériennes (fig. 2) ou sur les profils en long (fig. 3), ce qui correspond à une période de moins de 10 ans.

ÉVOLUTION DU LIT

Profil en long

La comparaison des lignes d'eau d'étiage de 1966-1987 et 1967-1979 (fig. 3A et B) indique une incision généralisée du chenal (abaissément d'environ 50 cm de la ligne d'eau), atteignant des maximums au droit des fosses d'extraction (80 à 120 cm). Ces fosses sont profondes et une érosion progressive et régressive se manifeste. Seul le secteur entre le pont de Champdivers et celui de Pesieux présente une stabilité relative, car le profil en long est contrôlé par des points durs correspondant au toit des marnes de Bresse (Malavoi, 2004).

Les profils en long du fond du chenal de 1987 et 1996 montrent une inversion de tendance. Les secteurs d'exhaussement (1 550 000 m³ ou 171 667 m³/an) couvrent alors les deux tiers du linéaire étudié (fig. 3C). L'incision se poursuit de façon très localisée, pour l'essentiel à l'aval des ponts dont les sections d'écoulement plus réduites augmentent les vitesses et la capacité de transport. Les fosses d'extraction de Champdivers (fosse 1) et de Fretterans (fosse 2) ont été comblées au cours de cette période. D'après les profils topographiques et les photographies aériennes, le volume de la fosse de Champdivers (fosse 1) a été estimé à 442 000 m³ en 1987 (arrêt de l'exploitation en 1984). Les apports depuis l'amont du tronçon d'étude étant estimés à 75 000 m³ annuels (Malavoi, 2004), nous pouvons ainsi établir que cette fosse pourrait avoir été comblée dès 1992. Concernant la fosse de Fretterans (fosse 2), son volume est estimé à 80 000 m³ en 1985. Elle a bénéficié des sédiments provenant des érosions de berges (8 000 m³/an) sur un tronçon de 3,5 km en amont; distance fondée sur l'hypothèse d'une vitesse moyenne de progression de la charge de fond de 500 m/an, valeur correspondant à la fois à la distance seuil-mouille observée au niveau des secteurs de méandrage, et à environ cinq fois la largeur du chenal (Carson et Griffiths, 1989; Ham et Church, 2000). Les processus d'érosion régressive depuis la fosse ont également fourni 4 500 m³/an de matériaux. Ces deux sources sédimentaires cumulées ont contribué à l'apport d'environ 12 500 m³/an permettant le comblement total de la fosse 2 dès 1993. Suite à son incision antérieure (1966-1987), le chenal s'est rétracté et les érosions de berges ont été significati-

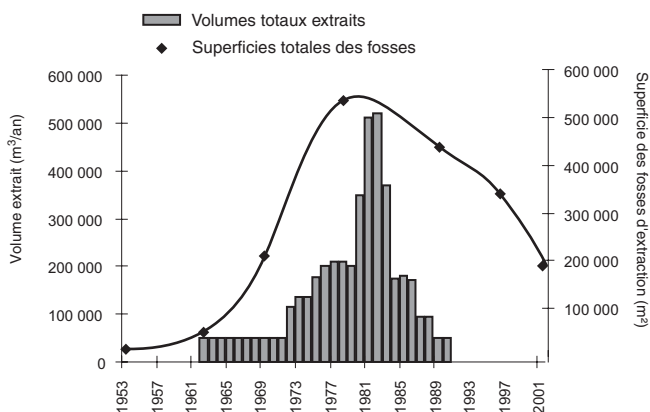


FIGURE 2. Variation de la superficie des fosses d'extraction étudiées et des volumes de sédiments extraits entre 1950 et 2001.

Variation of the studied in-stream pit areas and sediment volumes excavated between 1950 and 2001.

vement réduites sur la période plus récente (test de Wilcoxon, $p < 0,0001$ et $p = 0,04$) (fig. 4A et B). Elles n'ont contribué qu'à 30 % (77 700 m³/an) des entrées sédimentaires (comme les apports amont), contre 42 % (112 000 m³/an) pour les processus d'érosion progressive et régressive (Rollet, 2003). Ainsi, depuis 1983, les sédiments provenant de l'amont ne sont plus piégés à l'entrée du tronçon, mais contribuent à alimenter la section plus en aval et notamment la fosse 2. La comparaison des profils de ligne d'eau levés en 1996 et en 2003 confirme cette tendance (fig. 3B). Le profil au droit de la fosse de Champdivers (fosse 1) s'est stabilisé et nous observons une nette remontée de la ligne d'eau.

Seule la fosse de Lays-sur-le-Doubs (fosse 3) représente encore un obstacle au transit sédimentaire (fig. 5) et agit comme un piège à sédiments en aval de notre secteur d'étude. D'après les photographies aériennes et les images satellites, nous observons depuis 1989 la présence d'une flèche de sédiments à l'amont de la fosse progressant en moyenne de 35 mètres par an. Celle-ci est alimentée notamment par les sédiments déstockés par l'érosion régressive se manifestant à l'amont de la fosse 3. Ce phénomène est parfaitement visible sur l'image satellite de 1997, les bancs présents sur ce secteur en 1986 étant de plus en plus rares. Si les conditions hydrauliques et la fourniture sédimentaire restent identiques à la période précédente, la fosse de Lays-sur-le-Doubs ne sera pas comblée avant 30 ans, affectant donc durablement l'équilibre morphologique du secteur aval.

Les apports sédimentaires amont sont importants en raison des processus d'érosion régressive résultant de la rectification du Doubs et de la Loue à leur confluence, et de l'endiguement de cette dernière. Ces travaux de rectification réalisés entre 1960 et 1980 ont conduit à une réduction d'un kilomètre environ de la longueur du Doubs (13 % de la longueur initiale). Cette fourniture sédimentaire risque ainsi d'être provisoire, le temps que ces tronçons ajustent leur géométrie aux conditions hydrauliques imposées par les aménagements. Nous observons cependant que, sur la période 1996-2001, le chenal présente peu de sections en cours de rétraction

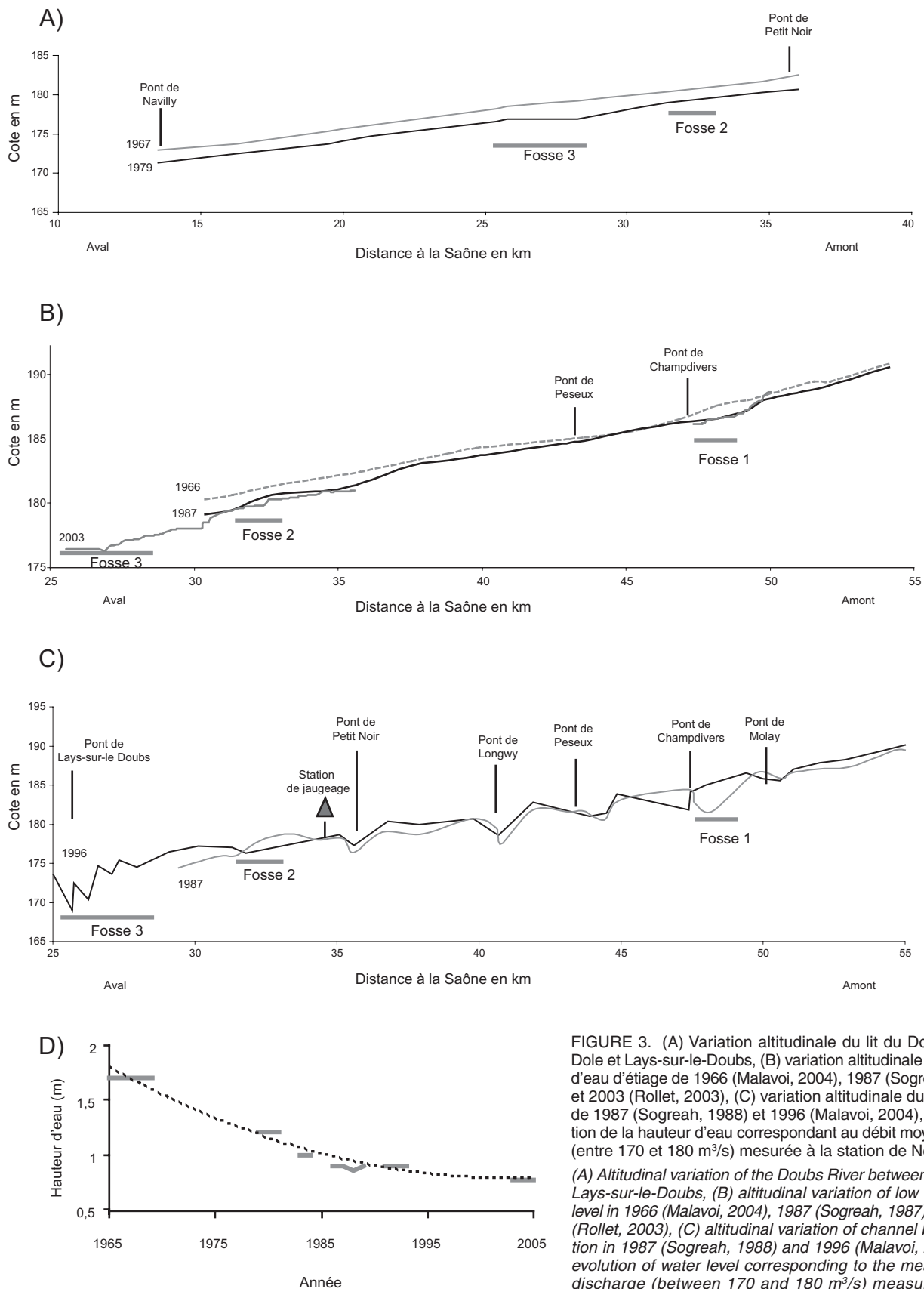


FIGURE 3. (A) Variation altitudinale du lit du Doubs entre Dole et Lays-sur-le-Doubs, (B) variation altitudinale de la ligne d'eau d'étiage de 1966 (Malavoi, 2004), 1987 (Sogreah, 1987) et 2003 (Rollet, 2003), (C) variation altitudinale du fond du lit de 1987 (Sogreah, 1988) et 1996 (Malavoi, 2004), (D) évolution de la hauteur d'eau correspondant au débit moyen annuel (entre 170 et 180 m³/s) mesurée à la station de Neublans.

(A) Altitudinal variation of the Doubs River between Dole and Lays-sur-le-Doubs, (B) altitudinal variation of low flow water level in 1966 (Malavoi, 2004), 1987 (Sogreah, 1987) and 2003 (Rollet, 2003), (C) altitudinal variation of channel bed elevation in 1987 (Sogreah, 1988) and 1996 (Malavoi, 2004), (D) evolution of water level corresponding to the mean annual discharge (between 170 and 180 m³/s) measured at the gauging station of Neublans.

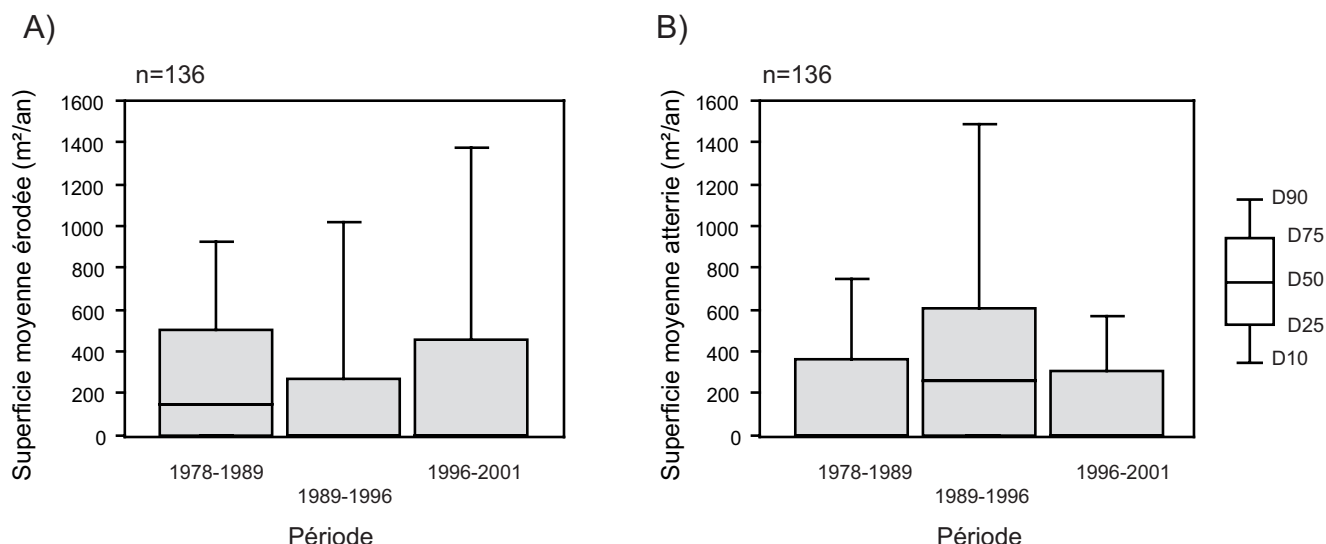


FIGURE 4. (A) Superficie moyenne annuelle érodée et (B) superficie moyenne annuelle atteinte entre 1978 et 2001 renseignées par sections fluviales de 250 m.

(A) Mean annual eroded surface areas and (B) mean annual vegetated surface areas between 1978 and 2001 from channel sections of 250 m.

alors que les érosions latérales sont plus importantes (fig. 4A et B), principalement au droit des anciennes fosses d'extraction (fig. 5 et 6A). Cette reprise significative des érosions (test de Wilcoxon, $p = 0,04$) ne peut s'expliquer par une augmentation des débits, ceux-ci ayant été faibles sur la période (fig. 5B). Selon un processus de rétroaction positive, l'élargissement du chenal consécutif aux extractions favorise la dissipation des écoulements et donc le dépôt de la charge de fond qui, lui-même, favorise la diffuence des écoulements et l'érosion latérale (fig. 5B et 6A). Les érosions de berge entre 1996 et 2001 ($112\,970\,m^3/an$) contribuent à plus de 45 % des apports sédimentaires, compensant ainsi la diminution des apports par incision du lit (23 % des apports annuels ou $58\,000\,m^3/an$) consécutive à la stabilisation du profil en long (Rollet, 2003).

Les courbes de tarage établies entre 1965 et 2003 à la station de jaugeage de Neublans nous permettent d'affiner la chronologie des processus d'incision (fig. 3D); cette station étant située à 2,5 km en amont de la fosse 2, elle a été affectée par l'érosion régressive. Sur l'ensemble de la période étudiée, la ligne d'eau s'est abaissée, démontrant une incision du lit. Nous repérons trois temps dans cette tendance générale: une incision de l'ordre de 50 cm sur la période 1969-1979 soit une vitesse de 5 cm/an qui s'accélère sur les cinq années suivantes avec une vitesse de 20 cm/an. Cette incision ralentit ensuite à partir des années 1985. Nous constatons ainsi un lien étroit avec l'évolution de l'intensité des extractions de granulats mise en évidence par l'étude des archives (fig. 2).

ÉVOLUTION DE LA GÉOMÉTRIE DES ZONES AQUATIQUES PÉRIFLUVIALES

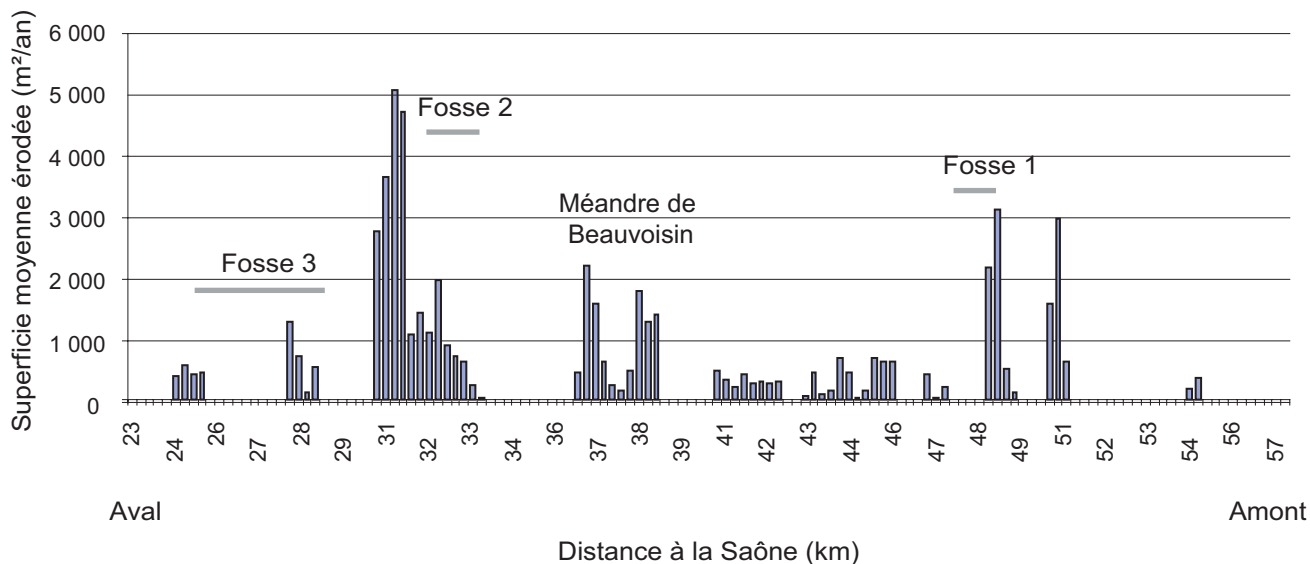
D'après les recensements effectués à partir des photographies aériennes de 1953 et 2002, il apparaît que pour un

faible débit (environ $50\,m^3/s$), un grand nombre de bras morts en eau a disparu, essentiellement entre les fosses 2 et 3 (fig. 1A), c'est-à-dire le secteur fortement concerné par les processus d'érosion régressive (fig. 5B). Sur cette même période, nous observons également la création d'un nombre important de bras morts, consécutive à la rectification de la confluence Loue-Doubs effectuée entre 1960 et 1980 (fig. 1A). En revanche, très peu de différences ont été observées à partir du second couple de clichés, la plupart des bras morts en eau identifiés en 1978 étant encore visibles en 2001 pour un débit avoisinant $125\,m^3/s$ dans le chenal principal (fig. 1B). Nous observons ainsi que pour de faibles débits, les connexions entre les bras morts et le chenal semblent d'autant plus détériorées que l'incision du chenal a été importante et persistante. Ce lien n'est cependant pas démontré lorsque les débits dans le chenal sont plus élevés.

Les variations de la superficie en eau ont été plus précisément étudiées au cours du temps sur les plus grandes ZAP. Une diminution générale des superficies en eau est observée à débit égal depuis 1953, y compris dans les secteurs éloignés des fosses d'extraction (fig. 7 et 8). Les valeurs de rétractions les plus élevées atteignent 90 %. Au cours de la période plus récente (1989-2002), les réductions maximales restent fortes (-60 %) alors que la période étudiée est plus courte, certaines ZAP enregistrent par ailleurs une nouvelle augmentation (TRA: +10 %; INGT: +18 %) de superficie (fig. 8). Ces ZAP se situent sur un secteur affecté par l'incision généralisée du chenal (abaissement de la ligne d'eau compris entre 30 et 90 cm entre 1966 et 1987), mais peu touché par l'incidence directe des fosses d'extraction ou les processus d'érosion progressive ou régressive. Ces secteurs sont en exhaussement depuis la fin des années 1980.

La réduction des ZAP étudiée entre 1953 et 1989 n'est pas statistiquement liée à la valeur de l'incision du chenal pour les années 1970 au droit de leur localisation (fig. 9A). La

A)



B)

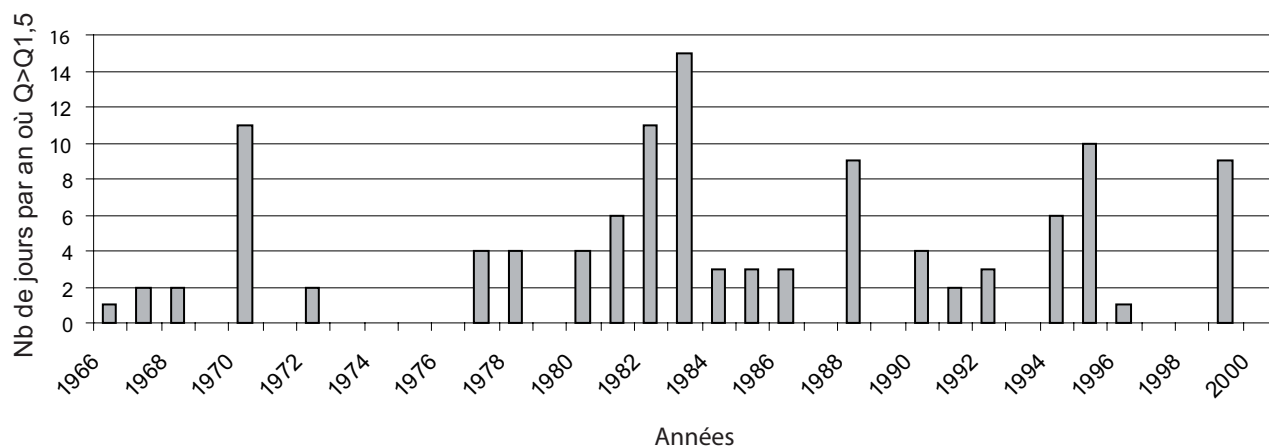


FIGURE 5. (A) Superficie moyenne annuelle érodée par tronçon de 250 m le long du Doubs et (B) nombre de jours par an pour lesquels $Q_{1,5}$ (920 m³/s) est dépassé entre 1966 et 2001.

(A) Mean annual eroded surface area per channel sections of 250 m along the Doubs River and (B) the number of days when $Q_{1,5}$ (920 m³/s) was exceeded between 1966 and 2001.

réduction est en fait corrélée à la taille des bras, elle-même corrélée à la pente des berges (fig. 9B). En d'autres termes, les bras de grande taille sont plus évasés et plus sensibles en surface à une réduction de leur plan d'eau. Ceci est indépendant de leur âge et de leur fréquence de connexion au chenal.

La simulation d'un abaissement de 80 cm de la ligne d'eau sur les profils topographiques levés dans les ZAP a permis de confirmer notre hypothèse selon laquelle l'abaissement du niveau d'eau dans les zones aquatiques périfluviales peut être indirectement mis en évidence par l'évolution surfacique des plans d'eau (fig. 10). Cela renforce également le résultat statistique présenté précédemment. La simulation montre une

réduction des superficies en eau variant de 4 à 100 % (tab. III). Les résultats d'une zone à l'autre ne sont cependant pas comparables, car les débits correspondant aux cotes de ligne d'eau lors des relevés topographiques ne sont pas identiques. Ainsi, une zone aquatique périfluviale, où la ligne d'eau de référence avant simulation de l'abaissement de la nappe correspond à un débit proche de l'étiage, est susceptible de connaître une plus forte réduction de sa surface en eau par rapport à une ZAP dont la ligne d'eau de référence correspond au module. La géométrie des zones humides influence également l'importance de la réduction surfacique. Ainsi, le plan d'eau de LON qui présente une réduction surfacique de 66 % dispose de berges en pentes douces et d'un profil en

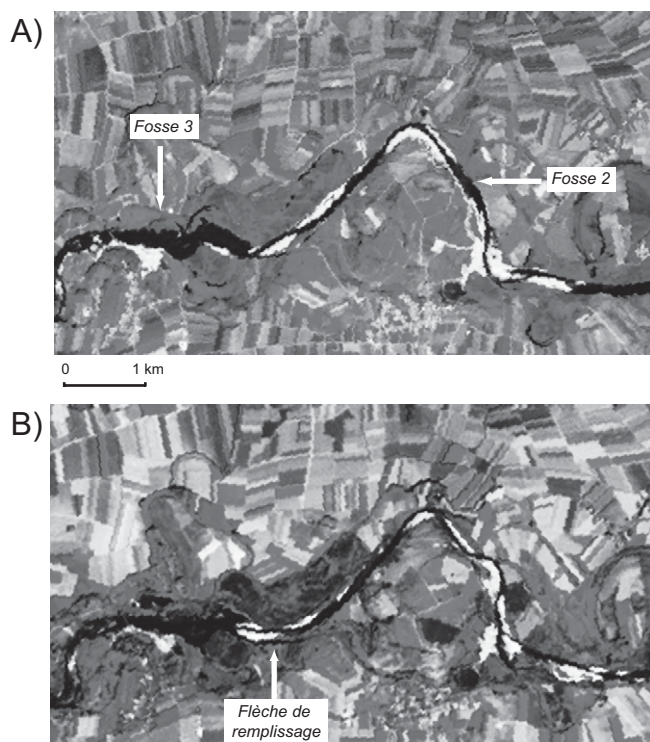


FIGURE 6. Images satellites SPOT 5 couvrant le secteur Fretterans—Lays-sur-le-Doubs de (A) 1986 et (B) 1997. Le débit enregistré à ces deux dates est de 100 m³/s (sources : CNES et GDTA).

SPOT 5 satellite imagery covering the Fretterans—Lays-sur-le-Doubs sector in (A) 1986 and (B) 1997. The recorded discharge for both dates is 100 m³/s (Sources : CNES and GDTA).

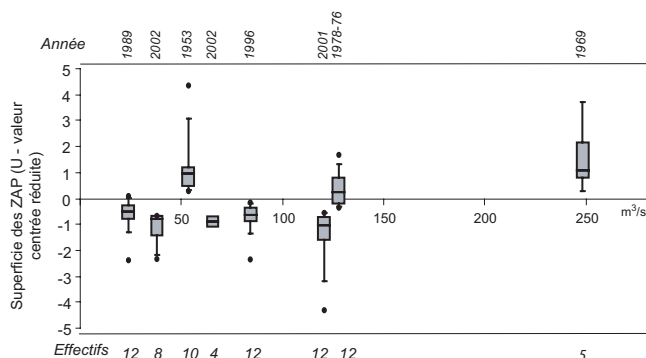


FIGURE 7. Évolution des zones aquatiques périfluviales en fonction du débit du Doubs à la station de Neublans depuis 1950.

Evolution of perfluvial aquatic zones according to discharge along the Doubs River at the gauging station of Neublans since 1950.

long comportant une multitude de seuils (fig. 10A et B). Au contraire, la ZAP de CHAR dont les berges sont plus raides et dont le profil en long n'est pas segmenté par des seuils exon-dés, présente une réduction de sa surface en eau de seulement 4 % (fig. 10C et D) pour un affaissement du plan d'eau de 80 cm.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

L'IMPACT DES EXTRACTIONS

L'activité extractive affecte l'évolution verticale du chenal, non seulement au droit des sites, mais aussi à l'aval et à

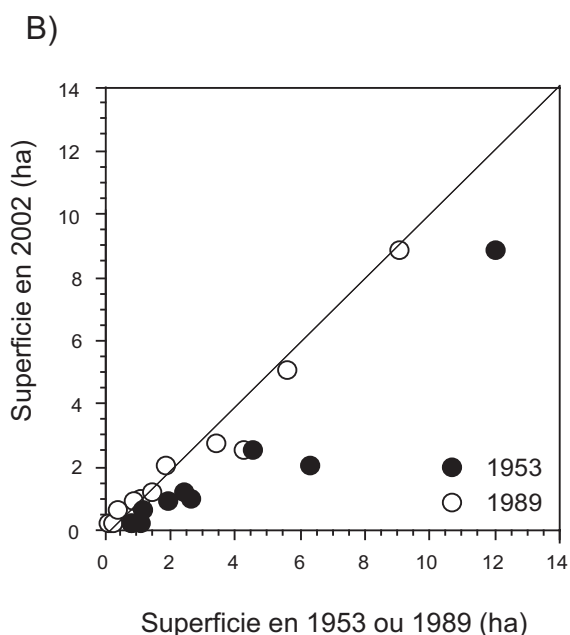
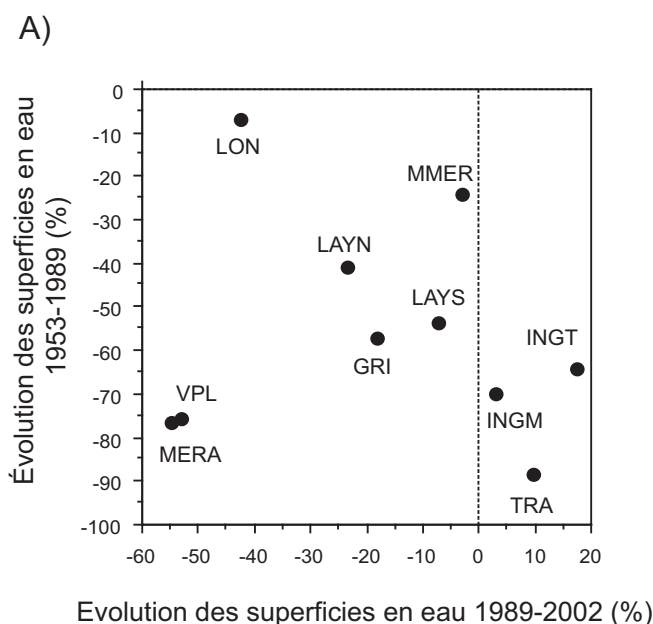


FIGURE 8. Comparaison de (A) l'évolution relative des superficies en eau entre 1953-1989 et 1989-2002 et (B) des superficies brutes entre 1953 et 2002 d'une part, et entre 1989 et 2002 d'autre part.

Comparison of (A) water surface relative evolution between 1953-1989 and 1989-2002 and (B) surface area between 1953-2002 and between 1989 and 2002.

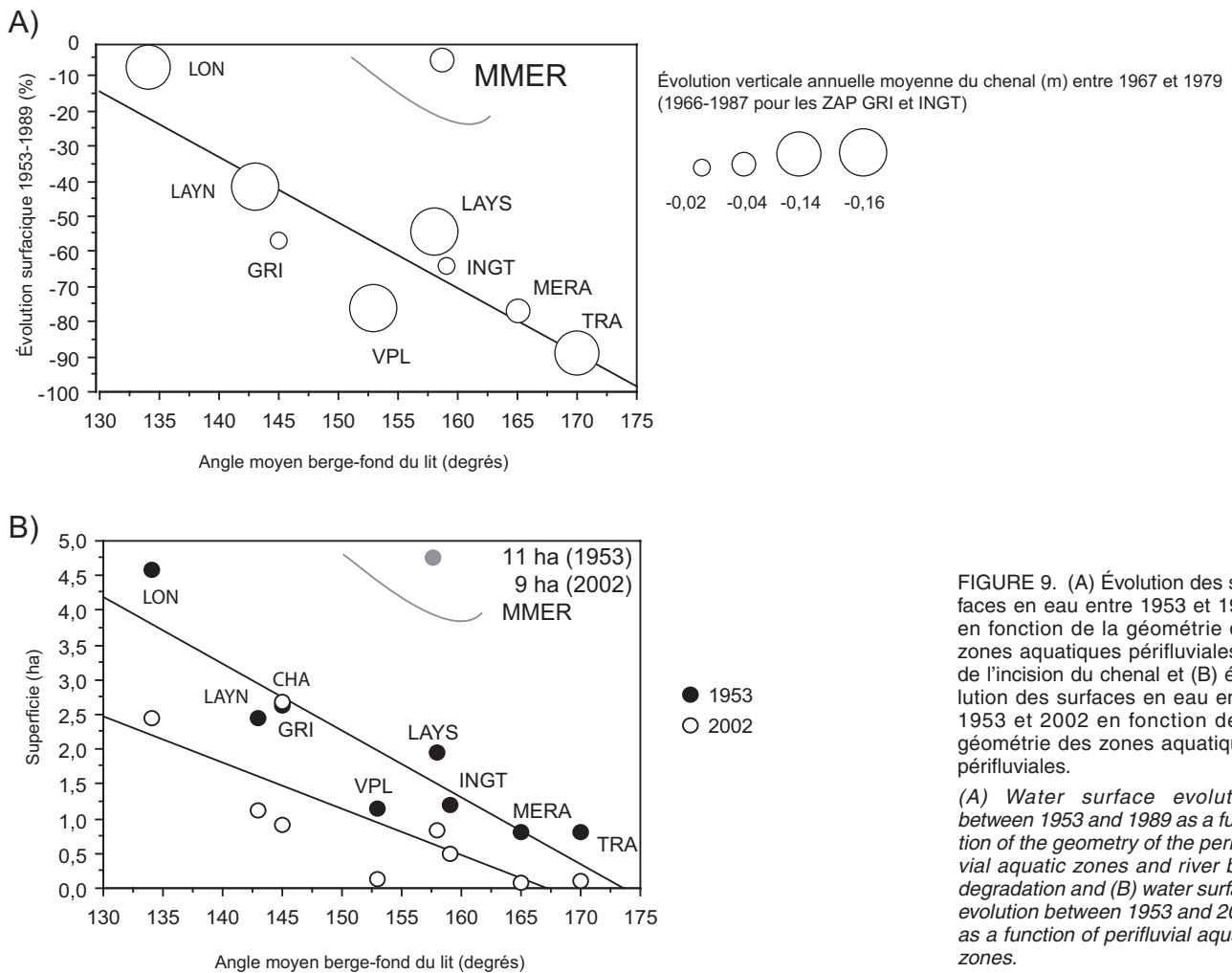


FIGURE 9. (A) Évolution des surfaces en eau entre 1953 et 1989 en fonction de la géométrie des zones aquatiques périfluviales et de l'incision du chenal et (B) évolution des surfaces en eau entre 1953 et 2002 en fonction de la géométrie des zones aquatiques périfluviales.

(A) Water surface evolution between 1953 and 1989 as a function of the geometry of the perfluvial aquatic zones and river bed degradation and (B) water surface evolution between 1953 and 2002 as a function of perfluvial aquatic zones.

l'amont de chacun d'eux. Le fait que le pic d'activité extractive soit synchrone de l'incision du lit valide clairement notre première hypothèse. Les incisions observées restent malgré tout modestes comparativement à ce que d'autres cours d'eau soumis à ce type d'activité ont enregistré (Landon et Piégay, 1994 ; Bravard *et al.*, 1999 ; Landon, 1999). La forte réactivité du Doubs, une fois l'activité extractive terminée, est en revanche assez originale. Les fosses se comblent rapidement et des exhaussements sont alors observés. Compte tenu de la configuration du tronçon et de la période de temps considérée, l'origine de ces sédiments est forcément locale, provenant du lit lui-même sur le tronçon plus amont, ou des érosions de berge. L'ajustement d'un tronçon aux extractions est donc relativement complexe, impliquant non seulement des ajustements verticaux au début de la période mais aussi latéraux dans un second temps. Ceci permet une certaine réversibilité de cette évolution.

La présente étude souligne également un lien entre l'incision du chenal et la réduction des superficies en eau des zones humides périfluviales de la basse vallée du Doubs du

fait de l'abaissement consécutif de la nappe d'accompagnement validant ainsi la seconde hypothèse. La réduction surfacique se manifeste par une réduction de la largeur et par une fragmentation de la ZAP en différents plans d'eau, les seuils apparaissant plus fréquemment en basses eaux. Ces exondations favorisent leur végétalisation par des ligneux qui à leur tour favorisent l'atterrissement par le peignage des sédiments.

Néanmoins, l'intensité de cet ajustement dépend de la pente des berges qui varie d'une zone aquatique périfluviale à l'autre. En d'autres termes, deux ZAP enregistrant le même affaissement du plan d'eau consécutivement à l'incision du lit suite aux extractions n'enregistreront pas la même réduction surfacique de leur plan d'eau. Celle-ci peut être nulle dans le cas de berges verticales. Notre seconde hypothèse est validée dans la mesure où la réduction surfacique des ZAP est bien synchrone de l'incision du lit. Néanmoins, il n'est pas possible de faire statistiquement un lien à l'échelle des ZAP entre l'incision du chenal au droit de ces entités et leur évolution surfacique du fait d'un trop faible nombre d'objets à comparer

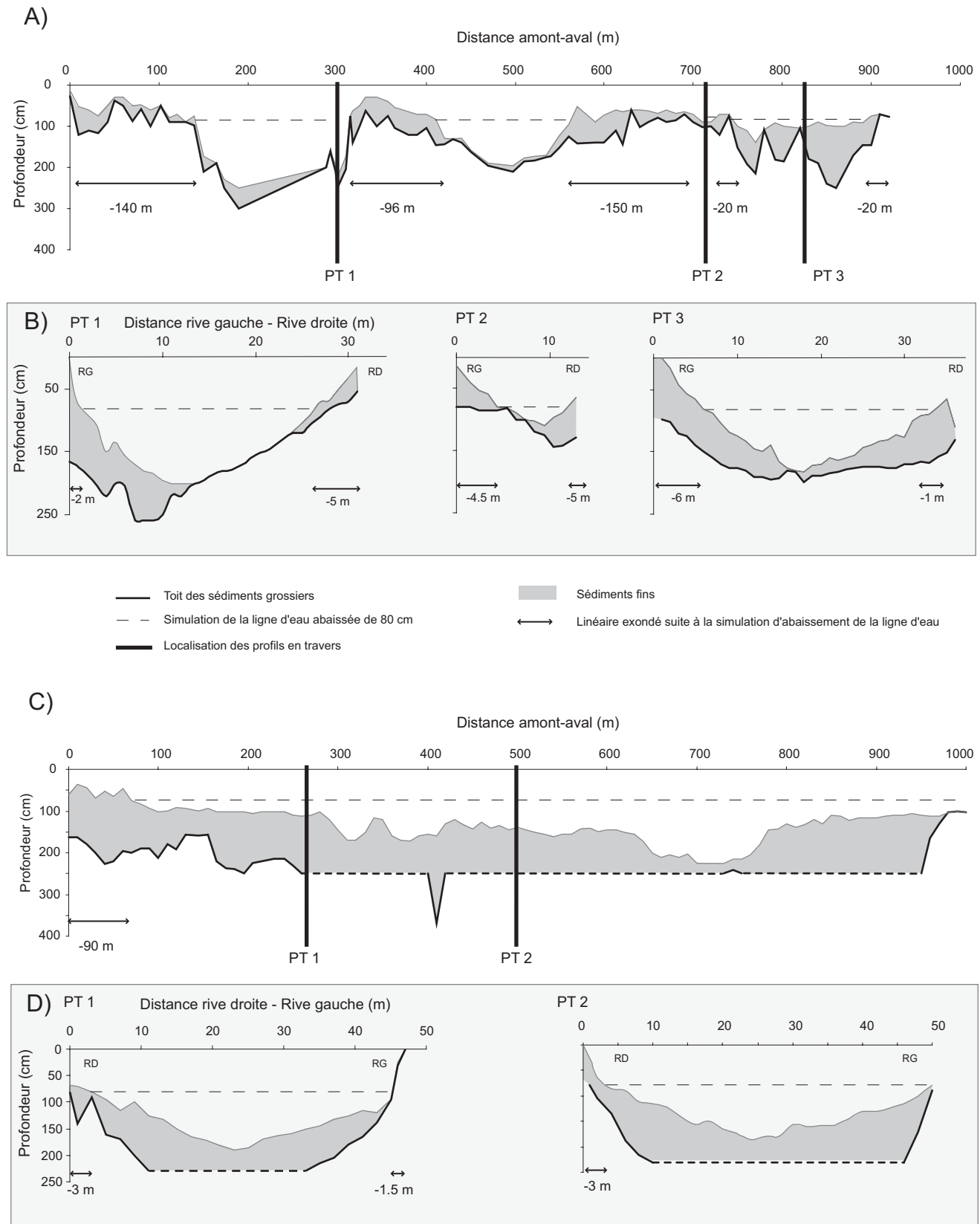


FIGURE 10. Profils en long et en travers des zones aquatiques péri-fluviales de (A et B) LON et de (C et D) CHAR et simulation de l'abaissement de la ligne d'eau de 80 cm.

Long and transverse profiles of the perfluvial aquatic zones of (A and B) LON and (C and D) CHAR and simulation of a water level lowering of 80 cm.

TABLEAU III

Comparaison des superficies des plan d'eau des zones aquatiques périfluviales estimées à partir des mesures topographiques et des photographies aériennes avant et après la simulation d'un abaissement de la ligne d'eau de 80 cm

Nom	Âge	Superficie en 1996 (m ²)	Superficie après l'abaissement du plan d'eau (m ²)	Évolution (%)
MMER	151	39 703	14 082	-65
CHAR	-	37 321	30 026	-20
LON	120	30 797	10 452	-66
LAYN	53	7 854	5 371	-32
INGT	106	5 014	1 454	-71
LAYS	176	4 189	2 241	-47
VPL	74	2 644	2 525	-5
MERA	93	1 729	0	-100
TRA	-	864	0	-100
GRI	131	10 706	0	-100
INGM	158	19 723	0	-100
VAR	41	Non calculé		

dans un cadre géométrique similaire (fig. 9). Les plus grandes ZAP, souvent des mouilles profondes, sont moins sensibles au morcellement et tendent à montrer une moindre réduction des superficies en eau, d'autant qu'elles ont des berges plus abruptes. Les plus petites semblent répondre avec moins d'inertie aux changements fluviaux que les plans d'eau plus massifs. Le fait qu'il soit possible de lier statistiquement affaissement du plan d'eau et géométrie montre que le fonctionnement hydrologique des ZAP est assez identique au sein de ce corridor fluvial et que, si leur géométrie le permet, celles-ci sont très sensibles au changement fluvial qui régit leur niveau d'eau. Cela conduit à minorer le rôle de la sédimentation dans la diminution surfacique de ces zones aquatiques périfluviales et ce, à l'échelle de la décennie étudiée. Si ce paramètre était variable d'une ZAP à l'autre en fonction de leur degré de connexion avec le chenal principal (Piégay *et al.*, 2000 ; Citterio et Piégay, sous presse), le lien statistique entre l'évolution surfacique de la ZAP et la pente des berges ne pourrait pas être établi.

NOTIONS DE RÉVERSIBILITÉ ET D'HISTOIRE DE VIE

De nombreuses études ont souligné les effets négatifs des extractions en lit mineur. La présente contribution, qui souligne des ajustements en cascade affectant le lit majeur, les extractions en lit mineur ayant contribué à la rétraction des ZAP du Doubs, vient ainsi conforter les résultats de Bornette et Heiler (1994) et Scott *et al.* (1999). Bornette et Heiler (1994) avaient déjà montré qu'un abaissement de 80 cm du niveau d'eau du Haut Rhône affecte le cortège floristique. Ces affaissements ont également des effets sur la croissance ligneuse s'ils se produisent brutalement (Scott *et al.*, 2000 ; Amlin et Rood, 2003) ou s'ils dépassent un certain seuil (Dufour et Piégay, sous presse).

En même temps, la réactivation récemment observée des processus d'érosion au droit des secteurs d'extraction artificiellement élargis, laisse entrevoir que ces actions pourraient être bénéfiques pour les écosystèmes riverains, dans un

contexte où les volumes extraits restent inférieurs aux apports de sédiments provenant de l'amont. Dans la mesure où elle engendre de l'hétérogénéité spatiale, la dynamique latérale restaurée est classiquement considérée comme le premier facteur de contrôle de la structuration de la mosaïque paysagère et de la diversité biologique (Salo *et al.*, 1986 ; Tabacchi, 1992 ; Ward *et al.*, 2002). Le cours d'eau retrouve alors ses capacités d'auto régénération des habitats et de maintien d'espèces pionnières spécifiques des milieux riverains. Les élargissements résultant des extractions ont des effets assez semblables à ceux d'opérations de redynamisation de cours d'eau par érosion latérale (Rohde *et al.*, 2004 ; Piégay *et al.*, 2005). Ce constat vient donc conforter les conclusions de certains auteurs montrant les effets bénéfiques des extractions de granulats, notamment pour les populations avicoles (Fustec et Frochot 1995) et piscicoles. Une fosse d'extraction offre en effet des conditions d'habitats différentes et peut également servir de refuge lors des crues (Boët *et al.*, 1998).

L'analyse de ce cas permet d'introduire deux points de discussion importants : (1) les actions humaines sur les cours d'eau sont traditionnellement considérées comme un préjudice alors que ce n'est pas forcément systématiquement le cas, d'autant que les cours d'eau, au moins en Europe, sont déjà des entités largement sous le contrôle d'actions humaines passées. Leurs états antérieurs successifs n'ont pas forcément plus de légitimité en tant que référence que leur état actuel (Bravard, 1981 ; Petts *et al.*, 1989 ; Kondolf *et al.*, 2007). Ainsi, l'histoire contemporaine des ZAP n'est pas uniquement associée aux extractions. Elles existent parce que le style fluvial s'est transformé au cours du 19^e siècle à la suite des endiguements et des recoupements artificiels de méandres. Ces derniers ont favorisé un chenal principal et l'abandon des chenaux secondaires (Sauty, 1999). Leur trajectoire évolutive est donc régie par des contrôles anthropiques externes. Dans ce contexte, il est difficile de parler de réversibilité des effets d'un impact particulier sur un écosystème en faisant référence à des conditions passées, considérées comme plus intéressantes puisque plus naturelles

(Bravard, 1991). L'histoire de vie de ces objets de nature est complexe. Dans le cas présent, les actions humaines ont largement contribué à la création de ZAP aux conditions d'habitat contrasté, puis à leur raréfaction. La réactivation d'une dynamique latérale à la fin de la période pourrait ouvrir une nouvelle phase dans leur évolution. Celle-ci peut être bénéfique d'un point de vue écologique si l'érosion latérale est suffisamment marquée pour permettre un renouvellement de ces milieux. (2) L'analyse des impacts et des ajustements des formes fluviales doit être considérée à une certaine échelle de temps. Il est donc nécessaire d'être prudent dans l'interprétation des liens de cause à effet et dans la détermination des évolutions futures par extrapolation de la tendance passée. Il est nécessaire, pour disposer d'une vision à plus long terme de l'évolution de ces milieux, de replacer le secteur étudié dans une logique amont-aval à plus petite échelle. La disponibilité de la charge en provenance de la haute vallée est une question importante. La régénération récente n'est peut être qu'un épisode transitoire lié à la disponibilité locale de la charge. Elle sera rapidement suivie par une période inexorable de raréfaction des apports sédimentaires et d'un enfoncement du lit. Il apparaît judicieux de scénariser l'évolution des lits fluviaux et de considérer leur évolution sur des trajectoires temporelles non linéaires. Ces trajectoires sont étroitement conditionnées par la disponibilité à long terme des flux de matière qui ont régi les géométries observées. Dans ce contexte, la notion de réversibilité, qui pose le problème de savoir si le cours d'eau peut ou non retrouver son état avant la perturbation, apparaît réductrice. Elle replace en effet le raisonnement sur l'évolution d'un lit fluvial dans un contexte de cyclicité et positionne au centre du débat les états antérieurs. Ces derniers sont considérés comme pertinents alors que l'échelle de temps sur laquelle ils sont définis est souvent trop réduite (10 à 50 ans).

NOTION DE FAISCEAUX CONVERGENTS D'ÉVIDENCE

L'analyse permet de mettre en lumière les liens de cause à effet et de comprendre le rôle des actions humaines sur l'évolution des formes fluviales. Il existe bien souvent des décalages temporels et spatiaux entre les secteurs où se manifestent les phénomènes causaux et ceux qui y répondent. De plus, de nombreux bruits anthropiques existent. Il peut être délicat de distinguer l'effet d'une pression par rapport à une autre, car le chenal peut répondre simultanément à des pressions différentes. Beaucoup d'auteurs ont ainsi abordé la question en soulignant l'ensemble des facteurs potentiels, la difficulté étant de les hiérarchiser, de distinguer le plus pertinent des autres. De fait, les approches quantitatives peuvent aider à mieux prendre en compte cette question. Elles permettent d'évaluer le temps de latence entre une pression et un impact (Liébault, 2003) ou de se placer dans un contexte expérimental afin de tester une hypothèse en s'appuyant sur un ensemble de démarches (Piégay et Schumm, 2003). Ce travail fournit donc un faisceau de preuves convergentes suffisamment robustes pour valider une incision du lit consécutif aux extractions et ses conséquences sur la géométrie des plans d'eau périfluviaux. Si les deux hypothèses initiales sont globalement validées, certaines limites interprétatives ont été

observées. Il n'a pas été possible par exemple de montrer le lien entre l'exhaussement récent et le relèvement du niveau d'eau dans les plans d'eau ou d'établir un lien statistique entre l'importance de l'affaissement d'un plan d'eau et le niveau d'incision du chenal. Ces éléments plus subtiles à identifier et ce, sur des périodes de temps plus courtes, n'ont pas pu être déterminés. Le nombre d'objets à comparer était en effet limité, compte tenu des contraintes successives imposées par l'analyse des documents anciens : avoir des objets d'une certaine taille pour qu'ils soient observables sur les photographies aériennes, avoir des périodes semblables pour comparer l'évolution du chenal (appréhendée par suivi topographique) et des bras (via les photographies, elles-mêmes n'étant comparables que pour des débits identiques).

Tous ces éléments soulignent que la pertinence des analyses rétrospectives repose sur la possibilité d'utiliser simultanément différentes sources, de combiner analyse historique et analyse *in situ* (notamment pour valider les temps de latence) afin de faire converger les évidences. Ces combinaisons aident également à développer une analyse critique des documents à exploiter : avoir des profils en long correspondant à un même paramètre (un fond de lit, une ligne d'eau pour un débit donné), un même linéaire, comparer des photos prises pour un même débit. Plus l'analyse est précise en reposant sur une documentation riche et un nombre de cas important, plus les causalités observées seront robustes.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une collaboration avec Gudrun Bornette (UMR 5023 du CNRS, Université Lyon I). Nous tenons à remercier la DIREN qui nous a ouvert ses archives, le PNRZH et le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche pour leur soutien financier. Merci également aux étudiants (Universités Lyon II et Lyon III) ayant participé à la collecte des données sur le terrain, à André Roy et aux lecteurs anonymes dont les remarques ont permis d'améliorer le manuscrit.

RÉFÉRENCES

- Amlin, N.M. et Rood, S.B., 2003. Drought stress and recovery of riparian cottonwoods due to water table alteration along Willow Creek. *Trees*, 17 : 351-358.
- Amoros, C., Piégay, H., Herouin, E., Bornette, G., Frochot, B. et Fouet, J.-M., 2000. Aide au diagnostic du fonctionnement des zones humides fluviales. Programme National de Recherche sur les zones humides, rapport final du projet 25, 74 p.
- Assani, A.A., 1997. Recherche d'impacts d'une retenue sur le comportement d'une rivière ardennaise (hydrologie, sédimentologie, morphologie, végétation) : cas du barrage de Butgenbach sur la Warche (Belgique). Thèse de doctorat, Université de Liège, 482 p.
- BRL, 1999. Géomorphologie et fonctionnement morphodynamique de la basse vallée du Doubs. Schéma de gestion des inondations de la vallée du Doubs, annexe 3, 31 p.
- Barnaud, G., 1996. Fonctions et rôles des zones humides. Actes du colloque de la Société Hydrotechnique de France « l'eau, l'Homme, la nature », Lyon, 1996, p. 307-316.
- Barrat-Segretain, M.H. et Amoros, C., 1996. Recovery of riverine vegetation after experimental disturbance : a field test of the Patch Dynamics Concept. *Hydrobiologia*, 321 : 53-68.

- Beaudelin, P., 1989. Conséquences de l'exploitation des granulats dans la Garonne. *Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*, 60: 603-616.
- Boët, P., Akopian, M., Belliard, J., Berrebi-dit-Thomas, R., Pourriot R., Talès, E. et Testard, P., 1998. Une faune aquatique sous pressions multiples. *In* M. Meybeck, G. de Marsily et E. Fustec, édit., *La Seine dans son bassin: fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*. Elsevier, Paris, 749 p.
- Bornette, G., Amoros, C., Piégay, H., Tachet, J. et Hein, T., 1998. Ecological complexity of wetlands within a river landscape. *Biological Conservation*, 85: 35-45.
- Bornette, G., Amoros, C. et Rostan J.-C., 1996. River incision and vegetation dynamics in cut-off channels. *Aquatic Sciences*, 58: 31-51.
- Bornette, G. et Heiler, G., 1994. Environmental and biological responses of former channels to river incision: a diachronic study on the upper Rhône river. *Regulated Rivers: Research and Management*, 9: 79-92.
- Bossy, G. et Glard, Y., 1981. Approche du coût réel pour la collectivité de granulats extraits dans le lit d'une rivière ou en alternative, dans une carrière en roche massive. *In* *La gestion régionale des sédiments*. Bureau de Recherche Géologique et Minière, Paris, p. 35-40.
- Bravard, J.-P., 1981. La Chautagne: dynamique de l'environnement d'un pays savoyard. *Institut des études Rhodaniennes des universités de Lyon*, 182 p.
- Bravard, J.-P., 1991. La dynamique fluviale à l'épreuve des changements environnementaux: quels enseignements applicables à l'aménagement des rivières. *La Houille Blanche*, 7-8: 515-521.
- Bravard, J.-P., Amoros, C., Pautou, G., Bornette, G., Bournaud, M., Creuzé des Chatelliers, M., Gibert, J., Peiry, J.-L., Perrin, J.-F. et Tachet, H., 1997. River incision in Southeastern France: morphological phenomena and ecological impacts. *Regulated Rivers: Research and Management*, 13: 75-90.
- Bravard, J.-P., Kondolf, G.M. et Piégay, H., 1999. Environmental and societal effects of channel incision and remedial strategies, p. 303-341. *In* S.E. Darby et A. Simon, édit., *Incised River Channel*. John Wiley and Sons, Chichester, 442 p.
- Carré, C. et Chartier, M., 2002. La gestion d'une ressource non renouvelable: entre gestion durable et aménagement des nuisances, le cas des granulats alluvionnaires en Île de France. *Annales de Géographie*, 626: 406-418.
- Carson, M.A., et Griffiths, G.A., 1989. Gravel transport in the braided Waimakariri river: mechanisms, measurements and predictions. *Journal of Hydrology*, 109: 201-220.
- Citterio, A. et Piégay, H., sous presse. Overbank sedimentation rates in former channels lakes: characterisation and control factors. *Sedimentology*.
- Collins, B. et Dunne, T., 1990. Fluvial geomorphology and river-gravel mining: a guide for planners, case studies included. California Department of Conservation, Division of Mines and Geology, Sacramento, Special publication, p. 98-129.
- Dufour, S. et Piégay, H., sous presse. Geomorphic control of ash growth and recruitment in floodplain forests along the Ain River, France. *Ecology*.
- Erskine, W.D. et Green, D., 2000. Geomorphic effects of extractive industries and their implications for river management: the case of the Hawkesbury-Nepean River, New South Wales, p. 123-149. *In* S. Brizga et B. Finlayson, édit., *River Management: The Australasian Experience*. John Wiley and Sons, Chichester, 310 p.
- Erskine, W.D., 1990. Environmental impacts of sand and gravel extraction on river systems, p. 295-302. *In* P. Davie, E. Stock et D. Low Choy, édit., *The Brisbane River: a Source Book for the Future*. Australian Littoral Society, Queensland.
- Erskine, W.D., 1997. The real environmental costs of sand and soil mining on the Nepean River, NSW, p. 29-35. *In* S.J. Riley, W.D. Erskine et S. Shreshta, édit., *Proceedings of the Conference on Science and Technology in the Environmental Management of the Hawkesbury-Nepean Catchment*. Geographical Society of New South Wales Conference Papers 14.
- Fustec, E. et Frochot, B., 1995. Les fonctions des zones humides, synthèse bibliographique. Agence de l'eau Seine-Normandie, 134 p.
- Gaillot, S. et Piégay, H., 1999. Impact of gravel mining on stream channel and coastal sediment supply: example of the Calvi Bay in Corsica (France). *Journal of Coastal Research*, 15: 774-788.
- Galay, V.J., 1983. Causes of river bed degradation. *Water Resources Research*, 19: 1057-1090.
- Ham, D.G. et Church, M., 2000. Bed-material transport estimated from channel morphodynamics: Chilliwack River, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 1123-1142.
- Harvey, M.D. et Schumm, S.A., 1987. Response of Dry Creek, California, to land use change, gravel mining and dam closure, p. 451-460. *In* R.L. Beschta, T. Blinn, G.E. Grant, G.G. Ice et F.J. Swanson, édit., *Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim*. International Association of Hydrological Scientists, Wallingford, IAHS Publication 165.
- Kondolf, G.M., 1993. Channel adjustment to reservoir construction and gravel extraction along Stony Creek, California. *Environmental Geology*, 21: 256-269.
- Kondolf, G.M., 1994. Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining. *Landscape and Urban Planning*, 28: 225-243.
- Kondolf, G.M., 1997. Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channel. *Environmental Management*, 21: 533-551.
- Kondolf, G.M. et Larson, M., 1995. Historical channel analysis and its application to riparian and aquatic habitat restoration. *Aquatic Conservation*, 5: 109-126.
- Kondolf, G.M., Piégay, H. et Landon, N., 2007. Changes in riparian zone of the lower Eygues River, France, since 1830. *Landscape Ecology*, 22: 367-384.
- Landon, N., 1999. Évolution contemporaine du profil en long des affluents du Rhône moyen. Constat régional et analyse d'un hydrosystème complexe: la Drôme. Thèse de doctorat, Université Paris-Sorbonne, 560 p.
- Landon, N. et Piégay, H., 1994. Incision de deux affluents subméditerranéens du Rhône: la Drôme et l'Ardèche. *Revue de Géographie de Lyon*, 69: 63-72.
- Larinier, M., 1980. Effets mésologiques des extractions de granulats dans le lit mineur des cours d'eau. Rapport de conférence de la FAO, Commission Européenne Consultative pour les Pêches dans les Eaux Intérieures, Vichy, p. 192-211.
- Laronne, J.B., 2000. Sédimentation et barrages: implications géomorphologiques, économiques et environnementales du comblement des réservoirs. Relation avec les extractions de matériaux fluviaux. *Aménagement et Nature*, 136: 101-112.
- Liébault, F., 2003. Les rivières torrentielles des montagnes drômoises: évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies). Thèse de doctorat, Université Lyon II, 358 p.
- Malavoi, J.R., 2004. Étude géomorphologique du Doubs aval. Rapport pour le compte du syndicat mixte Saône-Doubs, 124 p.
- Marston, R.A., Bravard, J.-P. et Green, T., 2003. Impacts of reforestation and gravel mining on the Malnant River, Haute-Savoie, French Alps. *Geomorphology*, 55: 65-74.
- Pautou, G., Girel, J., Peiry, J.-L., Hugues, F., Richards, K., Foussadier, R., Garguet-Duport, B., Harris, T. et Barsoum, N., 1996. Les changements de végétation dans les hydrosystèmes fluviaux. L'exemple du Haut Rhône et de l'Isère dans le Grésivaudan. *Revue d'Écologie Alpine*, 3: 41-66.
- Petit, F., Poinard, D. et Bravard, J.-P., 1996. Channel incision, gravel mining and bedload transport in the Rhône River upstream of Lyon, France. *Catena*, 26: 209-226.
- Petts, G.E., Möller, H. et Roux, A.L., 1989. Historical change of large alluvial rivers: Western Europe. John Wiley and Sons, Chichester, 355 p.
- Piégay, H., Bornette, G., Citterio, A., Herouin, E., Moulin, B. et Statiotis, C., 2000. Channel instability as a control on silting dynamics and vegetation pattern within perfluvial aquatic zones. *Hydrological Processes*, 14: 3011-3029.
- Piégay, H., Darby, S.E., Mosselman, E. et Surian, N., 2005. A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: sustainable

- approach to manage bank erosion. *River Research and Application*, 21 : 773-789.
- Piégay, H. et Peiry, J.-L., 1997. Long profile evolution of a mountain stream in relation to gravel load management : example of the middle Giffre River (French Alps). *Environmental Management*, 21 : 909-920.
- Piégay, H. et Schumm, S.A., 2003. System approaches in fluvial geomorphology, p. 269-288. *In* G.M. Kondolf et H. Piégay, édit., *Tools in Fluvial Geomorphology*. John Wiley and Sons, Chichester, 688 p.
- Ramez, P. et Gilard, O., 1992. Impact des extractions sur la dynamique du lit d'une rivière. Société hydrotechnique de France. L'avenir de l'eau, 22^e journées de l'hydraulique, Paris, 15, 16 et 17 septembre 1992.
- Rinaldi, M., Wyzga, B. et Surian, N., 2005. Sediment mining in alluvial channels : physical effects and management perspectives. *River Research and Applications*, 21 : 805-828.
- Rohde, S., Kienast, F. et Bürgi, M., 2004. Assessing the restoration success of river widenings : a landscape approach. *Environmental Management*, 34 : 574-589.
- Rollet, A.-J., 2003. Incidences des extractions sur la dynamique morphologique récente du Doubs dans sa basse vallée. Mémoire de DEA, Université Jean Moulin Lyon III, 66 p.
- Salo, J., Kalliola, R., Hakkinen, I., Makinen, Y., Niemela, P., Puhakka, M. et Coley, P.D., 1986. River dynamics and the diversity of Amazon lowland forest. *Nature*, 332 : 254-258.
- Sauty, C., 1999. Approche géoarchéologique de la basse vallée du Doubs : secteur d'Annoire, Fretterans, Longwy-sur-le-Doubs, Neublans et Petit Noir. Mémoire de maîtrise, Université de Franche-Comté, 54 p.
- Scott, K.M., 1973. Scour and fill in Tujunga Wash — A fan-head valley in urban southern California. United States Geological Survey, Reston, Professional Paper 732-B, 29 p.
- Scott, M.L., Lines, G.C. et Auble, G.T., 2000. Channel incision and patterns of cottonwood stress and mortality along the Mojave River, California. *Journal of Arid Environments*, 44 : 399-414.
- Scott, M.L., Shafroth, P.B. et Auble, G.T., 1999. Responses of riparian cottonwoods to alluvial water table declines. *Environmental Management*, 23 : 347-358.
- Shields, F.D., 1995. Control of streambank erosion due to bed degradation with vegetation and structure. *Water Resources Bulletin*, 31 : 475-489.
- Simons, D.B. et Lagasse P.F., 1976. Impact of dredging on river system morphology. *Proceedings of Conference Rivers '76*, American Society of Civil Engineers, 435-457.
- Sogreah, 1987. Étude d'aménagement du Doubs du barrage de Crissey à la limite interdépartementale Jura-Saône et Loire. Rapport pour le compte du syndicat mixte Saône-Doubs.
- Sogreah, 1988. Étude d'aménagement du Doubs du barrage de Crissey à la limite interdépartementale Jura-Saône et Loire : phase I, étude de l'état actuel de la rivière, 65 p.
- Suard, G., 1990. Effets des extractions de matériaux en rivières. Fédération des AAPP du Vaucluse, Assemblée générale du 1^{er} avril 1990. Cemagref, Aix-en-Provence, 15 p.
- Surian, N. et Rinaldi, M., 2003. Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. *Geomorphology*, 50 : 307-326.
- Surian, N., 1999. Channel changes due to river regulation : the case of the Piave River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24 : 1135-1151.
- Tabacchi, E., 1992. Variabilité des peuplements riverains de l'Adour. Influence de la dynamique fluviale à différentes échelles d'espace et de temps. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 227 p.
- Ward, J.V., Tockner, K., Arscott, B.D. et Claret, C., 2002. Riverine landscape diversity. *Freshwater Biology*, 47 : 517-539.